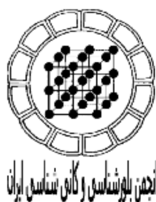
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و هفتم، شمارهٔ سوم، پاییز ۹۸، از صفحهٔ ۶۸۳ تا ۶۹۴



پراکندگی اندازه و شکل بلورهای پلاژیوکلاز در آندزیت‌های بازالتی شمال گاوخونی

مهناز خدامی*[1]، بهناز بختیاری[2]

۱- گروه زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۷/۸/۱، نسخه نهایی: ۹۷/۱۱/۲)

چکیده: پلاژیوکلاز فراوانترین کانی سازنده‌ی آندزیت‌های بازالتی شمال گاوخونی است که بصورت ریزسنگ و درشت‌بلور و با شکل‌های سه‌بعدی دوکی تا تیغه‌ای دیده می‌شود. اولیوین و پیروکسن از دیگر کانی‌های سازنده‌ی این سنگ‌ها هستند. بلورهای پلاژیوکلاز گاهی بافت غباری، منطقه‌بندی نوسانی و رشد سینوسی از خود نشان می‌دهند. براساس نتایج بررسی پراکندگی اندازه بلور، سرعت هسته‌بندی برای بلورهای پلاژیوکلاز $۲/۷۷×۱۰^{-۸}$ تا $۳/۰۷×۱۰^{-۸}$ $mm^{-3}s^{-1}$ و مدت زمان سرد شدن ۱۷/۷۷-۷۱/۰۸ سال برآورد شد که نشانه‌ی نرخ هسته‌بندی بالا، سردشدن سریع و مدت زمان نسبتاً کوتاه اقامت بلور در آشیانه ماگمایی است. نمودارهای پراکندگی اندازه بلور نشانگر فراوانی بلورهای کوچک‌تر و در ادامه رشد نسبی بلورهای متوسط بخرج آنها و همچنین وجود جمعیت بلوری دوگانه هستند. وجود جمعیت‌های بلوری متغیر می‌تواند ناشی از ورود مذاب جدید با مجموعه بلوری جدید به آشیانه‌ی ماگمایی باشد. این رخداد می‌تواند باعث افزایش حجم اتاق ماگمایی و کمک به خروج سریع‌تر ماگما شود.

واژه‌های کلیدی: *آندزیت بازالتی؛ پراکندگی اندازه بلور؛ مدت زمان اقامت بلور؛ پلاژیوکلاز .*

مقدمه

نظریه پراکندگی اندازه‌ی بلورها روشی فیزیکی و تکمیلی برای تحلیل داده‌های سنگ‌نگاری و زمین شیمی است که فرآیندهای فیزیکی درگیر در تبلور و سرعت آنها را بررسی می‌کند. در این روش، بر اساس اندازه دانه‌ها در سنگ‌ها، سرعت رشد و مدت زمان اقامت بلور تعیین می‌شود. پراکندگی اندازه بلور در اصل دربردارنده داده‌های اندازه بلور و تراکم جمعیت بلوری است. اندازه یک بلور یا دانه و شکل بلور شرایط تبلور و دوره های هضم و رشد را نشان می‌دهد. پلاژیوکلازها از جمله کانی‌های فراوان سنگ‌های آتشفشانی آهکی قلیایی هستند که قادرند روند تغییرات ماگما را در خود حفظ کنند. از این رو، اندازه، شکل و ترکیب این کانی در تحلیل و بازسازی فرآیندهای ماگمایی در پژوهش‌های گوناگون موردتوجه قرار گرفته است [۱-۴]. تبلور سنگ‌های آتشفشانی به سرعت حرکت مذاب، محیط سرد شدن ماگما، مدت زمان توقف در زمین، نرخ رشد و هسته‌گذاری بلورها و فرآیندهای آشیانه ماگمایی بستگی دارد. درجه تبلور و مقدار شیشه آتشفشانی، محیط تبلور، ارتباط بلورها طی فوران و پس از آن، مقدار مواد فرار و آلایش ماگمایی از عوامل موثر بر بافت سنگ‌های آتشفشانی هستند. تغییر ترکیب پلاژیوکلاز در حال رشد و ایجاد انواع منطقه‌بندی در آن، رشد سینوسی، بافت‌های برآمده از ذوب و تحلیل بلور در ماگما می‌توانند نشانگر فرآیندهایی مانند تغییر دما، فشار، فشار بخارآب و آلایش ماگمایی باشد. افزون بر بررسی‌های تحلیلی بافتی و کانی‌شناسی، توزیع پراکندگی و الگوی فضایی بلورها برای تعیین شرایط فیزیکی تشکیل و رشد کانی‌ها و از جمله پلاژیوکلازها که فراوان‌ترین کانی سنگ‌های آندزیت بازالتی شمال گاوخونی نیز هستند، مفید است. این کانی با منطقه‌بندی شیمیایی متنوع، بافت

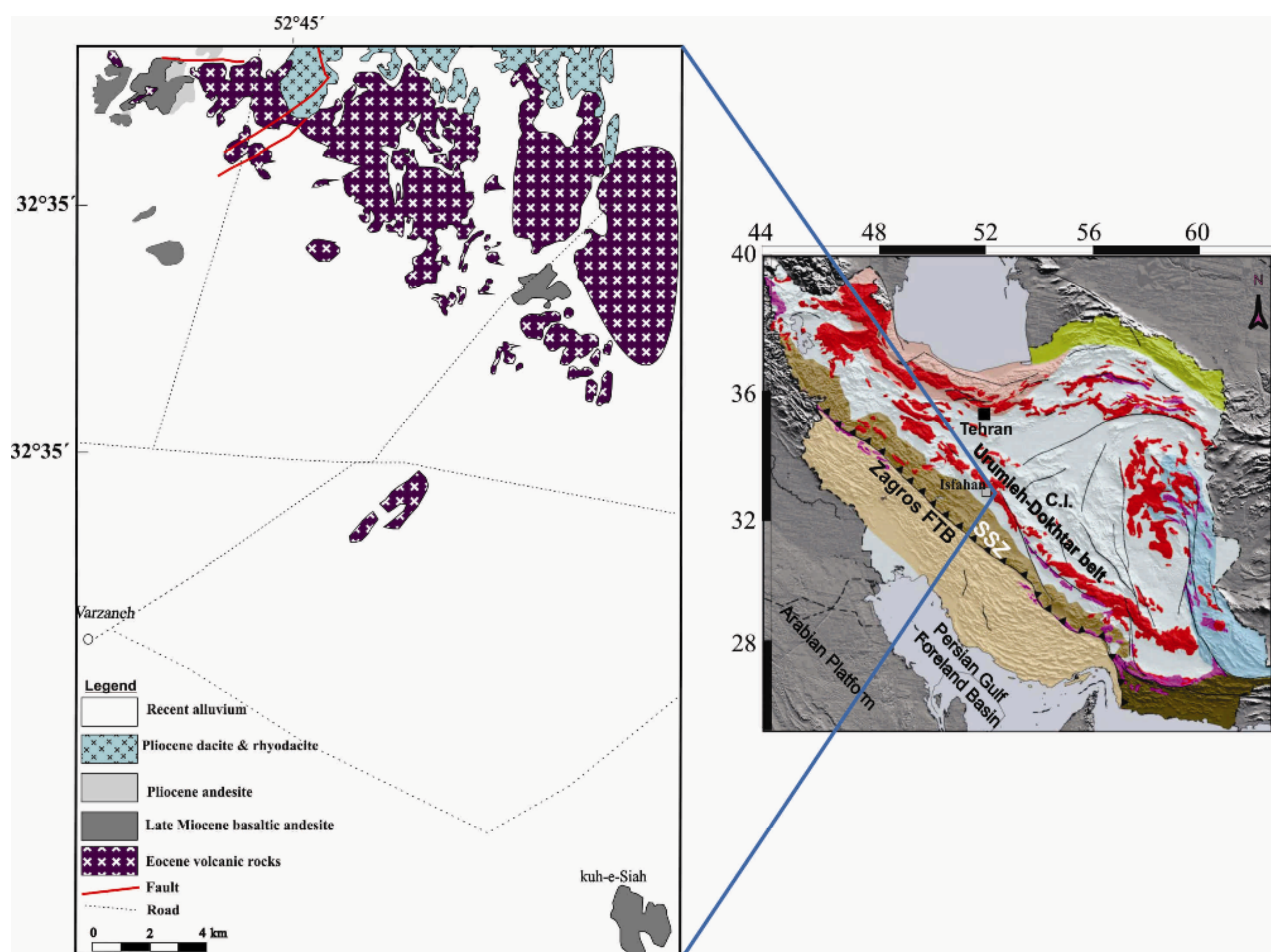
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۳۵۳۱۲۳۳۲۶۹، نمابر: ۰۳۵۳۸۲۱۱۲۷۹، پست الکترونیکی: khodami_m@yazd.ac.ir

[DOI: 10.29252/ijcm.27.3.683]

غباری به صورت ریزبلور و درشت‌بلور در این سنگ‌ها بـه‌چـشم می‌خورد. در این پژوهش بافت‌های ویژه این کانی و تنوع انـدازه و شکل بلورها برای درک بهتـر فرآینـدهای مـوثر در دگرگـونی ماگمای سازنده‌ی این سنگ‌ها بررسی می‌شود.

زمین‌شناسی عمومی

از نظر واحدهای زمین‌شناسی ساختاری گستره مورد بررسی جزو نوار آتشفشانی پهنه ایران مرکزی ارومیه – دختر است. رخنمون سنگ‌های آتشفشانی میوسن پسین، پلیوسن- کواترنری در ۱۲۰ کیلومتری جنوب شرق شهر اصفهان، جنوب- جنوب غربی نائین و شمال باتلاق گاوخونی قرار دارند. کمربند ماگمایی ارومیه-دختر به‌موازات پهنه زاگرس و سنندج- سیرجان با پهنای ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتر و طول ۱۸۰۰ کیلومتر از شمال غربی به جنوب شرق از آذربایجان تا مکران در کرانه پهنه ایران مرکزی قرار دارد [۵]. این پهنه شاهد تکاپوی ماگمایی گسترده‌ای در سنوزوئیک به‌ویژه ائوسن بوده که تا پلیوسن و کواترنری ادامه داشته است. فعالیت آتشفشانی اواخر میوسن، پلیوسن تا کواترنری قاره‌ای بوده است و این سنگ‌ها بیشتر به‌صورت گنبد، گنبد گدازه و گدازه رخنمون دارند. سنگ‌های آندزیت بازالتی، آندزیت، داسیت و ریوداسیت اواخر میوسن تا پلیوسن سنگ‌شناسی عمده‌ی منطقه هستند [۶،۵]. سنگ‌های آندزیت بازالتی با سن تقریبی اواخر میوسن در این منطقه در سیاه‌کوه علی‌آباد و کوه‌سیاه در کرانه شمال باتلاق گاوخونی رخنمون دارند. این سنگ‌ها به‌صورت جریان گدازه و اسکوری دیده می‌شوند و پیرامون مراکز خروج گسترش یافته‌اند [۶] (شکل ۱).



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه ساده شده از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ نایین [۵].

[DOI: 10.29252/ijcm.27.3.683]

روش بررسی

نمونه‌های آندزیت بازالتی از نقاط مختلف سیاه‌کوه علی‌آباد و کوه‌سیاه گاوخونی گردآوری و ویژگی‌ها و ارتباط صحرایی سنگ‌ها، مشخصات ظاهری و ساخت‌های ویژه مربوط به سنگ‌های آتشفشانی و یا عوامل ثانویه در آن‌ها بررسی شد. سپس از نمونه‌های مناسب، مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شد. بررسی سنگ نگاری آنها با میکروسکوپ قطبشی انجام گردید و در این ضمن، از تصاویر عکس‌برداری شد و جهت تحلیل آماری شکل و اندازه بلورها در مقاطع نازک به‌منظور گردآوری داده‌های خام از روش هیگینز [۷] استفاده شد. برای این منظور، نخست عکس‌های دیجیتالی بصورت پی‌درپی گرفته و توسط نرم افزار Microsoft ICE به هم چسبانده شد تا سطح بیش‌تری از مقطع پردازش گردد. سپس، با استفاده از نرم افزار Corel PHOTO- PAINT X8 بلورهای پلاژیوکلاز از سایر بلورها جدا شدند. در این مرحله، بلورهایی با قابلیت جداسازی آسانتر از زمینه و دگرسانی کمتر به عنوان نماینده‌ی کل سنگ انتخاب شدند که بلورهای انتخابی برای هر مقطع حدود ۲۰۰ بلور بودند. سپس جهت تعیین ویژگی‌هایی مانند طول، عرض، مکان مرکز بلورها و درجه گردشدگی از نرم افزار Image J برای تصاویر سیاه و سفید استفاده شد. در آخر، برای تبدیل داده‌های دوبعدی به سه‌بعدی و رسم نمودار توزیع پراکندگی اندازه نمونه‌ها از نرم افزار CSD Correction استفاده گردید. سپس، نتایج با توجه به شواهد کانی شناسی تجزیه و تحلیل شدند.

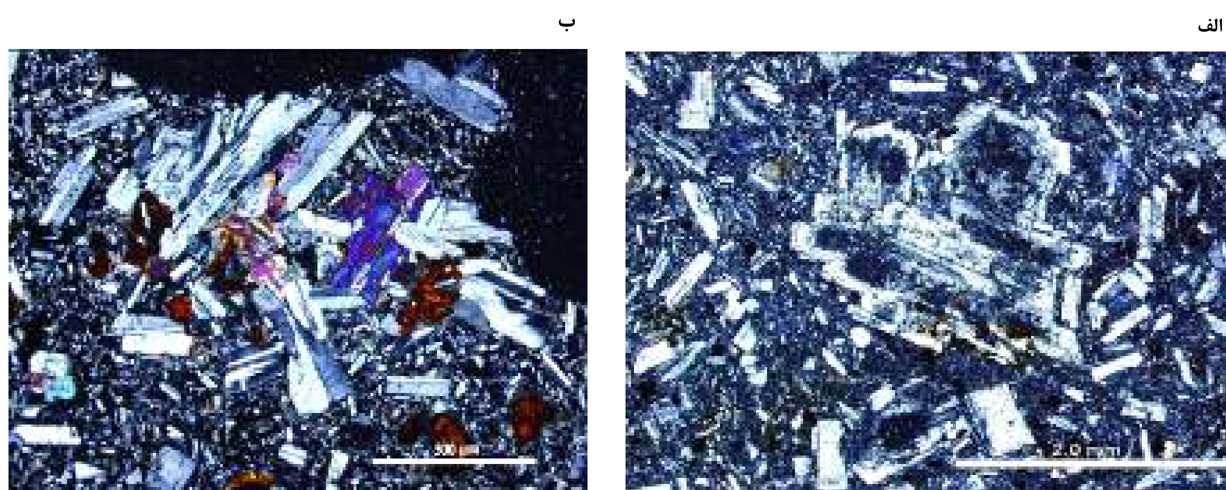
بحث و بررسی

سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی

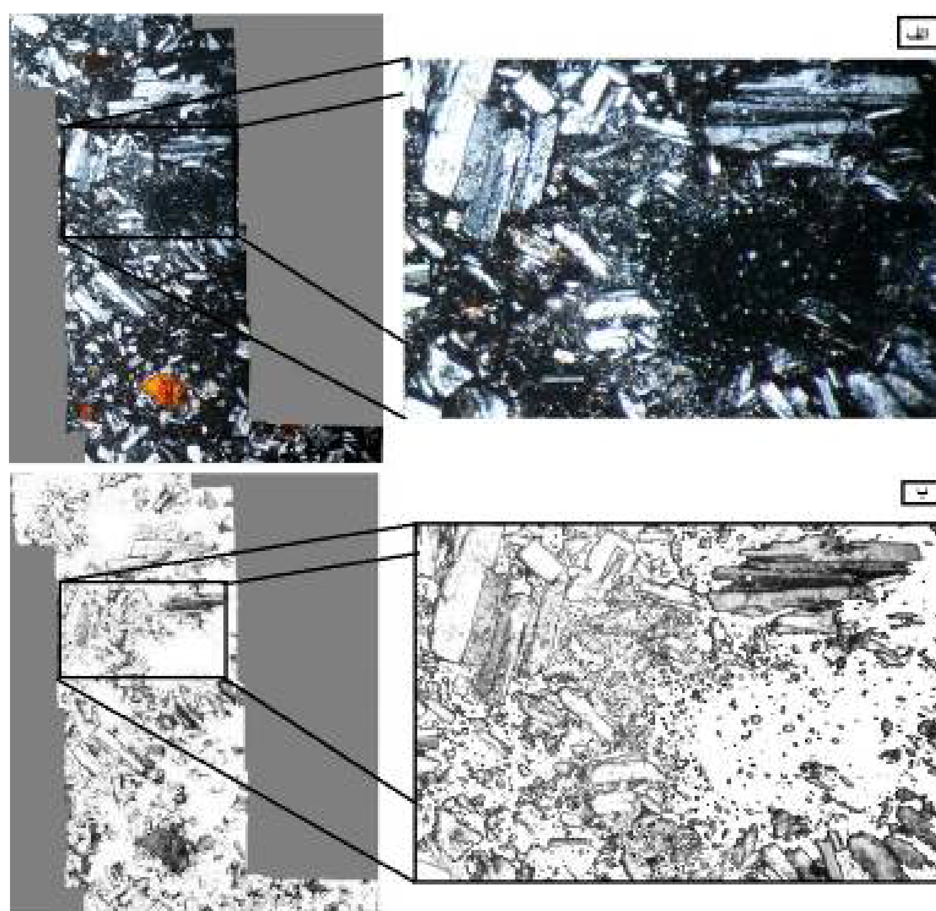
بافت اصلی سنگ‌های آندزیت بازالتی ریزسنگی پورفیری است که درشت‌بلور بزرگ‌تر از ۱ میلی‌متر نیز در آنها دیده می‌شود. بافت حفره‌دار به ویژه در نمونه‌های اسکوری و همچنین بافت گلومروپرفیری از دیگر بافت‌های قابل مشاهده است که در آنها گلومرول‌ها از انباشت تک‌کانیایی یا چند کانیایی تشکیل شده‌اند [۶] (شکل‌های ۲ و ۳).

الیوین مهم‌ترین کانی مافیک این سنگ‌هاست که به‌صورت درشت‌بلور تا حدود ۲ میلی‌متر و ریزدرشت بلور دیده می‌شود. تقریباً در بیشتر نمونه‌ها، همه یا بخشی از این کانی به ایدنگزیت تبدیل شده است. برخی از اولیوین‌ها شکل‌های خلیجی دارند که بیش‌تر ناشی از هضم و تحلیل رفتن بلور در مذاب اطراف و در اثر تغییر شرایط پایدار به نیمه پایدار است. پیروکسن‌ها در زمینه و یا به‌صورت لبه واکنشی پیرامون اولیوین دیده می‌شوند. درشت‌بلورها و ریزبلورهای پلاژیوکلاز با منطقه‌بندی شیمیایی نوسانی، عادی و گاهی معکوس و بافت غباری فراوان‌ترین کانی سنگ‌های آتشفشانی منطقه هستند [۶] (شکل‌های ۳ و ۲). منطقه‌بندی شیمیایی از ویژگی‌های بافتی پلاژیوکلازهاست که با تغییرات مقدار آنورتیت از مرکز به لبه مشخص می‌شود. منطقه‌بندی نوسانی و عادی نیز در این پلاژیوکلازها دیده می‌شود، اما در برخی بلورها به ویژه انواع دارای بافت غباری، افزایش مقدار آنورتیت در لبه گزارش شده است [۶]. با افزایش دما و فشار بخار آب، یا کاهش فشار طی صعود ماگما و یا تغییرات ترکیب شیمیایی ماگما مقدار آنورتیت پلاژیوکلاز افزایش می‌یابد [۸]. منطقه‌بندی نوسانی در پلاژیوکلاز به تغییرات ترکیب ماگما در اثر تغییر غلظت سازنده‌ها در پیرامون بلور مرکزی و یا تغییرات دما و فشار بخار آب و حتی عملکرد جریان‌های همرفتی در آشیانه ماگمایی مربوط شده [۹،۱۰] و تغییرات متناوب این عوامل منجر به منطقه‌بندی نوسانی در پلاژیوکلاز می‌شود. بافت غباری، لبه‌های گردشده در پلاژیوکلاز و کانی‌های دیگر اغلب به باز بودن سیستم ماگمایی، شرایط غیرتعادلی و جریان همرفتی در آشیانه ماگمایی نسبت داده می‌شود. بلورهای جدایش یافته قادر به شناوری در ماگما و تماس بیش‌تر با مذاب هستند که منجر به افزایش احتمال انحلال و تشکیل این بافت‌ها می‌شود. کاهش ناگهانی فشار و یا آمیختگی ماگمایی نیز می‌تواند بافت غباری ایجاد کند. در ادامه تبلور در این منطقه، پلاژیوکلاز با ترکیب جدید و در تعادل با مذاب دربرگیرنده رشد می‌کنند [۹-۱۲]. بافت غباری گاهی در مرکز بلور و گاهی در لبه این کانی در سنگ‌های مورد بررسی دیده می‌شود (شکل‌های ۲ و ۳). گسترش بافت غباری در پلاژیوکلاز به ترکیب اولیه کانی مربوط است. گرمای مذاب داغ جدید و یا کاهش فشار در بالا آمدن ماگما و تغییرات فشار بخار آب منجر به ذوب می‌شود. آثار ذوب و تحلیل بلور در مناطق غباری قابل مشاهده است [۹-۱۲]. با نبود شواهد قوی برای آمیختگی ماگمایی، بافت غباری لزوماً این موضوع را ثابت نمی‌کند.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.3.683]



شکل ۲ الف) تصویر میکروسکوپی (XPL) دو نسل پلاژیوکلاز با بافت غباری و رشد بلورهای بهم چسبیده پلاژیوکلاز در آندزیت بازالتی با بافت ریزبلور پورفیری. ب) بافت گلومروپرفیری در آندزیت بازالتی گلومرول که از کانی‌های پلاژیوکلاز، اولیوین و پیروکسن در زمینه‌ی شیشه و ریزدرشت بلور تشکیل شده است.



شکل ۳ الف) تصویر اصلی و ب). تصویر پردازش شده نمونه مورد بررسی.

شکل و پراکندگی اندازه بلور

بررسی پراکندگی اندازه بلورها روشی تکمیلی در سنگ شناسی است. بر پایه این روش ویژگی‌های مختلفی از بلور چون شکل، اندازه و فراوانی اندازه‌های مختلف بلور بررسی و با تفسیر آنها شرایط تبلور مشخص می‌شود. برای بررسی شکل بلور در فضای سه بعدی از نسبت منظر بلور، یعنی طول: عرض: ارتفاع

[DOI: 10.29252/ijcm.27.3.683]

آن (S:I:L، بعد کوتاه: بعد متوسط: بعد بلند) استفاده می‌شود [۱۴،۱۳،۷]. برای ساده سازی محاسبات، نسبت یاد شده به دو نسبت S/I و I/L تبدیل و از نتایج به دست آمده برای بیان کمی شکل بلورها استفاده می‌شود، بطوریکه مد عرض به طول (W/L) برابر با نسبت بعد کوتاه به بعد متوسط است [۱۳]. با توجه به خمیدگی نمودار در شکل ۴، نسبت بعد متوسط به بعد بزرگ محاسبه می‌شود. با افزودن مقدار ۰٫۵ به خمیدگی توزیع نسبت عرض به طول بلورها در مقطع نازک می‌توان مقدار I/L را با رابطه زیر بدست آورد که

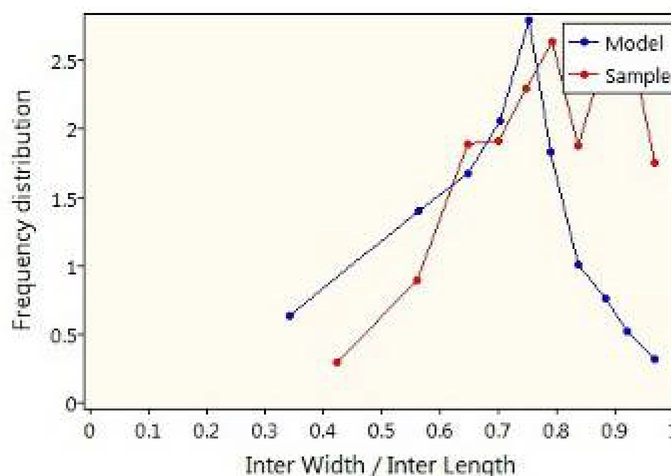
I/L = ۰٫۵+ خمیدگی (۱)

(۲) میانگین (W/L)-[(مد (W/L) × انحراف استاندارد(W/L)] = خمیدگی

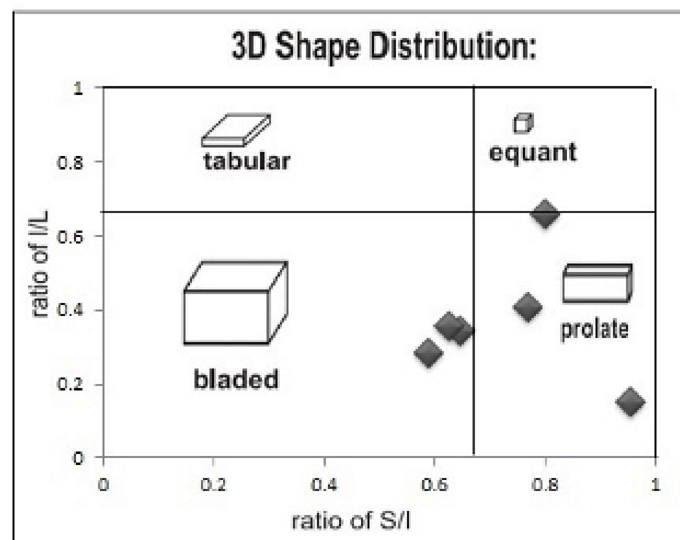
ضریب ثابت شکل (طول مشخصه) از نسبت تعداد بلورها در واحد حجم (N_V) به تعداد بلورها در واحد سطح (N_A) تقسیم بر اندازه متوسط بلورها ($D = S + I + L/3$) محاسبه می‌شود:

$$\sigma = (N_V/ N_A)/D \quad (۳)$$

شکل بلورها در نمودارهای زینگ یا نمودار I/L نسبت به S/I رسم شده‌اند (شکل۵) [۱۵]. در این نمودار، بلورها به انواع هم-بعد، تخته‌ای، کشیده و تیغه‌ای رده‌بندی می‌شوند. با اینکه در سنگ‌های آتشفشانی بلورهای تخته‌ای فراوان‌ترند، اما بررسی شکل بلورها نشان می‌دهد که بلورهای سازنده سنگ‌های مورد بررسی ابعاد نامساوی دارند، متوسط طول آنها کم‌تر از بلورهای تخته‌ای است و بیشتر به شکل تیغه‌ای، کشیده یا دوکی هستند (جدول ۱، شکل ۵).



شکل ۴ نمودار پراکندگی نسبت‌های عرض به طول بلورهای مقطع شماره ۷ قله شدید مقدار مد را نشان می‌دهد.



شکل ۵ شکل بلورهای پلاژیوکلاز و نمودار زینگ برای نمونه‌های مورد بررسی [۱۵].

جدول ۱ ارتباط ابعاد بلور در نمونه‌های مورد بررسی.

Sample	S	I	L	S/I	I/L	σ
۵	۱	۱٫۲۵	۱٫۹	۰٫۸	۰٫۶۶	۱۲٫۹
۶	۱	۱٫۳	۳٫۲	۰٫۷۷	۰٫۴۱	۱۵٫۲
۷	۱	۱٫۰۵	۷	۰٫۹۵	۰٫۱۵	۱۱٫۸
۹	۱	۱٫۵۵	۴٫۵	۰٫۶۴	۰٫۳۴	۹٫۲
۱۱	۱	۱٫۷	۶	۰٫۵۹	۰٫۲۸	۱۳٫۳
۱۲	۱	۱٫۶	۴٫۵	۰٫۶۲	۰٫۳۵	۱۳٫۴

افزون بر شکل بلورها، نظریه پراکندگی اندازه‌ی بلورها همچنین روشی تکمیلی برای شناخت سرعت فرآیندهای فیزیکی در تبلور نیز است [۱۶]. اساس این روش بر پایه اندازه دانه‌ها و فراوانی آنها در سنگ است. تعیین اندازه یک بلور یا دانه، در واقع مشخص کردن فضای دربرگیرنده بلور است. عوامل اصلی در تحلیل پراکندگی اندازه بلور برای پلاژیوکلازهای آندزیت بازالت‌ها محاسبه و نمودارهای فراوانی اندازه‌های مختلف بلور رسم شد (جدول ۲، شکل ۶). تنوع اندازه بلورهای پلاژیوکلاز از ریزسنگ تا درشت‌بلور قابل توجه است. نمودار پراکندگی اندازه بلورها یک رابطه لگاریتمی خطی- توزیعی با افزایش اندازه بلور دارد. در نمودار فراوانی لگاریتمی بلورها نسبت به اندازه دانه‌ها، نرخ رشد بلور از شیب نمودار لگاریتمی در گستره زمانی مشخص تعیین می‌شود. محل تلاقی شیب نمودار (S) با محور فراوانی لگاریتمی چگالی هسته‌بندی (N^0) را نشان می دهد؛ متصل کننده خط این دو شاخص نمودار توزیعی اندازه بلور خواهد بود. برای یک دوره زمانی سرد شدن ۳- ۳۰۰ سال (۳سال برای سرد شدن اغلب مذاب‌های بازالتی و ۳۰۰ سال برای مخازن کم عمق) سرعت رشد بلور پلاژیوکلاز $۱۰^{-۱۰}$تا $۱۰^{-۹}$ میلی‌متر بر ثانیه محاسبه شده است [۱۷]. براساس این فرض می‌توان مدت اقامت ماگمایی بلور پلاژیوکلاز مورد بررسی را محاسبه کرد (جدول ۲) سرعت رشد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = -1/G \quad (۴)$$

$$J = G N^0 \quad (۵)$$

در این رابطه S شیب نمودار، T مدت‌زمان رشد بلور بر حسب سال، JS شیب نمودارپراکندگی، J سرعت هسته‌بندی بر حسب $mm^{-3}s^{-1}$ و G سرعت رشد برحسب mms^{-1} است. سرعت هسته‌بندی نشانه تراکم هسته‌بندی صفر N^0 است. همچنین در جدول ۲، T مدت زمان رشد بلور بر حسب سال است.

بر این اساس، سرعت هسته‌بندی بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی $۲٫۷۷\times۱۰^{-۸}$ تا $۳٫۰۷\times۱۰^{-۸}$ $mm^{-3}s^{-1}$ و مدت‌زمان اقامت ماگمایی بلور ۱۷٫۷۷-۷۱٫۰۸سال بدست آمد.

رابطه‌ی بین مدت زمان اقامت، ضریب ثابت شکل و سرعت رشد از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۶].

$$G = \sigma/t \quad (۶)$$

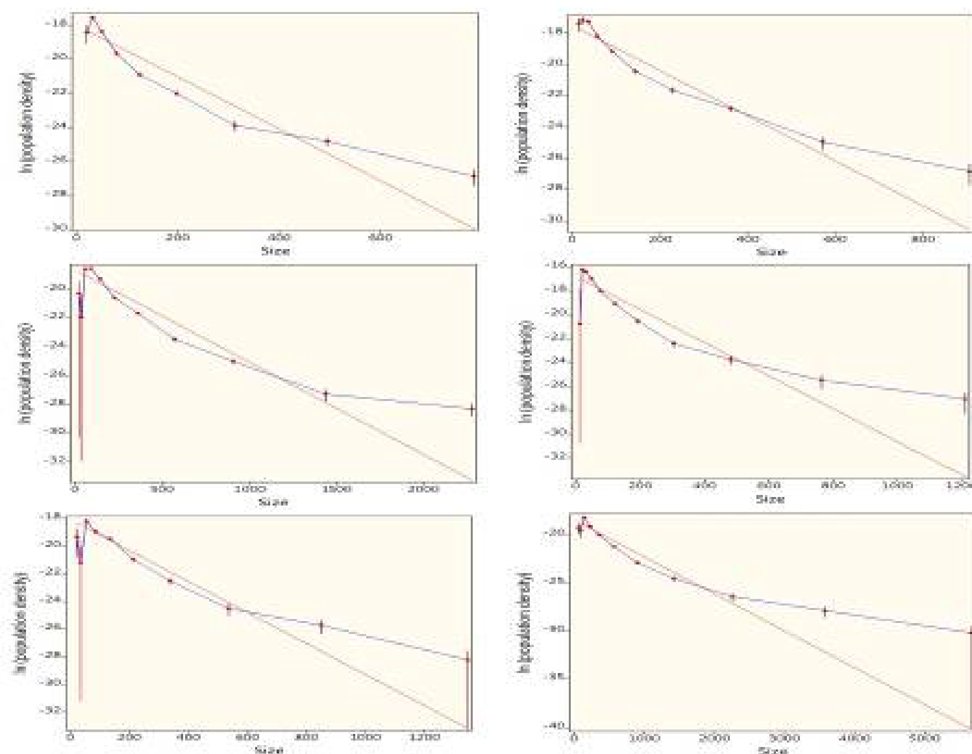
بافت یک سنگ متاثر از اندازه، شکل، جهت‌یابی، موقعیت و ارتباط بلورهاست. بلورها طی هسته‌گذاری و رشد تحت تاثیرعوامل کینتیکی قرار داشته ولی سرانجام به سمت تعادل پیش می‌روند. بافت سنگ‌های آتشفشانی پیشینه‌ی گرمایی سیستم را در خود حفظ می‌کند. بلورهای سنگ‌های آتشفشانی آثار درشت‌شدگی در اتاق ماگمایی یا مجرا پیش از فوران را بخوبی بازگو می‌کنند. روند گسترش بافتی از هسته‌گذاری، رشد تا درشت شدگی ساده ادامه می‌یابد [۱۸]. سرعت سردشدن بر بافت و ترکیبات بلوری، تراکم بلورها، ریختار، فراوانی و اندازه بلور اثر می‌گذارد. افزایش سرعت هسته‌بندی و فراوانی تعداد بلورهای پلاژیوکلاز نسبت به سرعت رشد در سرعت بالای سردشدگی رخ می‌دهد، که در این بافت و شیمی بلور نیز خود را نشان می‌دهد و در سرعت پایین سردشدگی، بیشتر فازهای کانیایی قابلیت ایجاد هسته‌های فراوان را ندارند، که باعث رشد بیش‌تر هسته‌های موجود می‌شود. با افزایش سرعت رشد بلورهایی با شکل‌های هم بعدتر تشکیل می‌شوند [۱، ۱۹]. عواملی که که باعث رشد بلور می‌شوند وابسته به انتشار سازنده‌ها و تعداد اتم‌های موجود در ساختار بلور است.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.3.683]

بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی تیغه‌ای تا دوکی شکل بوده و هم بعد نیستند. این موضوع بیانگر فشار پایین سیستم، سرعت هسته‌بندی و انتشار بالاتر و رشد کم بلور ضمن حرکت است که با شرایط آتشفشانی قابل توجیه است. پلاژیوکلازهای ریزبلوری و درشت‌بلورهای دارای منطقه‌بندی و گاهی بافت غباری، شرایط تبلور و دوره‌های هضم و رشد را نشان می‌دهند. درشت بلورها در محیطی نسبتا ساکن شکل‌های نزدیک به هم‌بعد ایجاد می‌کنند، در صورتیکه رشد بلور ضمن حرکت ماگما بلورهای کشیده‌تری را بوجود می‌آورد، زیرا جابه‌جایی ماگما در این محیط ناآرام بیشتر است، بلورها از حالت هم‌بعد دور شده و شکل‌های طویل‌تر و نازک‌تر ایجاد می‌کنند.

جدول۲ نتایج برآمده از نمودارهای پراکندگی اندازه بلور برای نمونه‌های مورد بررسی.

نمونه	شیب (S)	عرض از مبدا	$G(mms^{-1})$	$J(mm^{-3}s^{-1})$	T(yr)
۵	-۱۵٫۲	-۱۸	$۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{-۱۰}$	$۲٫۹۷×۱۰^{-۸}$	۷۱٫۰۸
۶	-۱۴٫۴	-۱۷٫۵۱	$۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{-۱۰}$	$۲٫۸۸×۱۰^{-۸}$	۶۷٫۳۴
۷	-۶٫۴	-۱۸٫۶۵	$۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{-۱۰}$	$۳٫۰۷×۱۰^{-۸}$	۲۹٫۹۳
۹	-۱۳٫۸	-۱۶٫۸۱	$۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{-۱۰}$	$۲٫۷۷×۱۰^{-۸}$	۶۴٫۵۳
۱۱	-۱۱٫۲	-۱۸٫۰۹	$۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{-۱۰}$	$۲٫۹۸×۱۰^{-۸}$	۵۲٫۳۷
۱۲	-۳٫۸	-۱۸٫۵۳	$۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{-۱۰}$	$۳٫۰۵×۱۰^{-۸}$	۱۷٫۷۷



شکل۶ نمودارهای لگاریتمی چگالی انباشتی نسبت به اندازه بلورها برحسب میکرومتر برای نمونه های مورد بررسی. فراوانی بیش‌تر بلورهای کوچک و ریزسنگ‌های پلاژیوکلاز در این نمودارها دیده می‌شود. تغییر ناگهانی شیب نمودار در سمت چپ ناشی از فرآیند حذف بلورهای ریزدانه است. درشت شدگی بافتی و یا رشد سینوسی منجر به شیب ملایمی در سمت راست نمودار شده و نمودار بسمت راست دچار شکستگی‌هایی است که نشانه‌ی وجود جمعیت بلوری با اندازه متفاوت است.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.3.683]

نمودارهای پراکندگی اندازه بلور

زمان توقف و رخدادهای آشیانه‌ی ماگمایی، نرخ سرد شدن ماگما و شرایط گوناگون تبلور ماگما، افزون بر بافت و زمین شیمی، بر نمودار پراکندگی اندازه بلورها نیز اثر می‌گذارد [۲۰-۲۲]. نمودارهای فراوانی اندازه بلورها حالت‌های مختلفی را نشان می‌دهند که هریک به توضیح پراکندگی جمعیت‌های بلوری کمک می‌کند. نمودار پراکندگی اندازه بلورها طی تبلور در شرایط عادی مستقیم و به صورت یک خط راست با شیب منفی است که روند متداول سرد شدن و تبلور ماگما و درشت شدگی را نشان می‌دهد، بطوری که فراوانی بلورهای کوچک‌تر بیش‌تر از بلورهای درشت‌تر است [۲۰-۲۲]. پژوهش‌های تجربی در ارتباط با رشد بلورها نشان می‌دهد که در آغاز هسته‌گذاری یک وقفه زمانی وجود دارد. هسته‌گذاری متراکم به درجات بالای سردشدگی سریع یا فوق اشباعی نیاز دارد. هسته‌گذاری هر بلور احتمالا به یک دوره کوتاه محدود است و با یک دوره‌ی رشد و تثبیت دنبال می‌شود. در عمل، هسته‌گذاری و رشد همزمان رخ نمی‌دهد. هسته‌گذاری و رشد بلور سازوکارهای رقابتی هستند که هر دو درجه فوق اشباعی مذاب را کاهش می‌دهند. رخداد هسته‌گذاری‌های متعدد در آشیانه‌ی ماگمایی و طی صعود احتمالا وابسته به آشفتگی سریع فشار و دماست [۲۳]. طی رشد، هسته‌گذاری انجام نمی‌گیرد، چون وقتی بلورها شروع به رشد می‌کنند درجه فوق اشباعی لازم برای هسته‌گذاری کاهش می‌یابد، هسته‌گذاری متوقف می‌شود و پیشرفت نمودار توزیع اندازه بلورها تنها بخاطر رشد هسته‌هایی است که در آغاز ایجاد شده‌اند. پس از هسته‌گذاری، از آنجا که نسبت سطح به حجم در هسته‌های فراوان‌تر بالاست، سطح بالای انرژی با تبلور خنثی می‌شود. بلورهای کوچک سطح و انرژی بیش‌تری دارند و برای رسیدن به تعادل انحلال بلورهای کوچک‌تر رخ می‌دهد. این عمل (عمل‌آوری استوالد[1]) باعث کاهش تراکم بلورهای کوچک می‌شود، به تدریج ذرات کوچکتر حذف شده و ذرات باقیمانده بزرگ‌تر می‌شوند. ذرات با اندازه متوسط تمایل دارند که طی این فرآیند با جذب اتم‌های سازنده بر سطح بلوری خود رشد کنند. به این منظور، طی یک فرآیند نفوذ رقابتی اندازه متوسط دانه‌ها افزایش و چگالی تعداد آنها کاهش می‌یابد. بلورهای کوچک به دلیل سطح انرژی بالاتر بطورکامل یا بخشی حل می‌شوند و نرخ رشد منفی آنها با روند رشد متناسب بلورها سازگار است. بطورکلی، سازوکار وابستگی سرعت رشد به اندازه بلور مشخص نیست، اما ارتباط نزدیکی بین رشد متناسب و کنترل شده با نقل و انتقال سازنده‌ها وجود دارد [۲۳].

افزایش سرعت رشد با افزایش اندازه بلور در سیستم‌های مختلف دیده می‌شود که باعث کاهش شیب منحنی فراوانی اندازه‌ی دانه‌ها می‌شود. پس در نبود هسته‌گذاری جدید، برخوردگاه منحنی با محور عمودی پایین‌تر می‌آید. این رخداد در همبستگی با رشد منفی بلورهای کوچک، تراکم جمعیتی بلورهای کوچک و در کل تعداد بلورها را کاهش می‌دهد و منحنی می‌تواند در جهت خلاف عقربه‌های ساعت چرخش کند، به طوری که منحنی در اثر افزایش سرعت رشد نسبت به اندازه بلور کم شیب و نسبتاً صاف می‌شود. در نتیجه تفسیر سنتی نمودارهای پراکندگی اندازه‌ی بلور در سنگ‌های آذرین ممکن است در اصل ناقص باشد، زیرا شیب نمودار نمی‌تواند سرعت متوسط رشد را نشان دهد. بنابراین شیب اولیه منحنی بیش‌تر از اینکه به میانگین سرعت رشد وابسته باشد به زمان و تفاوت سرعت رشد بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین بلورها مربوط است. همچنین برخوردگاه منحنی و محور عمودی (عرض از مبدا) نمی‌تواند نشانگر چگالی هسته‌گذاری اولیه باشد، بلکه حد پایین آن را نشان می‌دهد [۲۳].

در صورت وجود دو یا چند دسته بلور از نظر اندازه، نمودار پراکندگی اندازه‌ی بلور منحنی‌های شکسته‌ای را نشان می‌دهد. در واقع، هر روند منحنی در نمودار پراکندگی اندازه بلورها، از دو یا چند خط مستقیم در نمودارهای جداگانه و در شرایط مجزا تشکیل می‌شود، مقدار خمش نمودار به علت لگاریتمی بودن محور عمودی بستگی به اختلاف شیب نمودار پراکندگی اندازه‌ی بلور دارد [۲۰-۲۲]. هر چه جمعیت‌های بلوری آمیخته از نظر اندازه‌ی بلور متفاوت باشند، یا ماگما تبلور بیش‌تری را پشت سرگذاشته باشد، خمیدگی منحنی‌ها بیش‌تر می‌شود. توقف‌های مکرر ماگما در آشیانه‌ی ماگمایی می‌تواند باعث ایجاد چند مرحله‌ی تبلور و سرانجام ایجاد نمودارهای پراکندگی اندازه‌ی بلور منحنی شکل شود. حتی تنها دو دوره‌ی سرد شدن متفاوت از تبلور برای ایجاد چنین الگوی پراکندگی بلور کافی است. در کل، رخداد خمش در نمودار نشان‌دهنده‌ی تغییر در شرایط تبلور است. بنابراین در تحلیل نمودارهای پراکندگی اندازه‌ی بلور، نکات بیان شده را باید در نظر داشت. تغییرات در نمودار پراکندگی اندازه‌ی بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی نیز

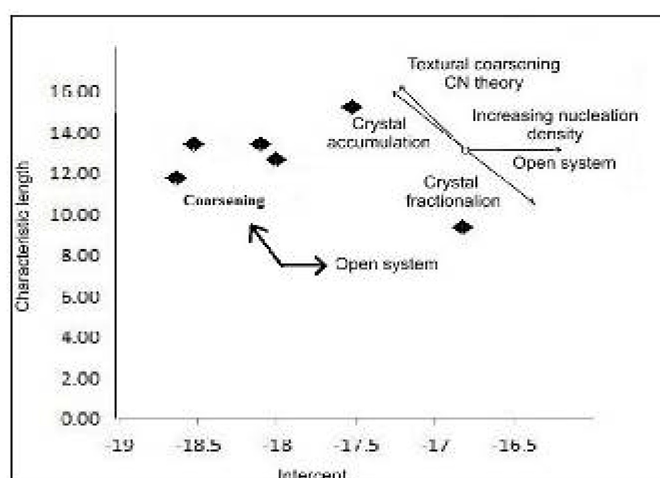
1- Ostwald ripening

نیاز به تفسیر دارد. در این نمودارها، بلورهای کوچک پلاژیوکلاز فراوانی بیش‌تر و بلورها با اندازه متوسط تا درشت فراوانی متوسط نسبی نشان می‌دهند. تغییر ناگهانی شیب نمودار در سمت چپ و محل فراوانی بلورهای ریزدانه ناشی از فرآیند حذف بلورهای ریزدانه است. بلورهایی متوسط در اثر درشت‌شدگی بافتی و یا رشد سینوسی بزرگ‌تر شده‌اند که باعث ایجاد شیب ملایمی در سمت راست نمودار شده است. با این وجود، نمودار بسمت راست دچار شکستگی‌هایی است که نشانه‌ی دوگانگی بافتی از نظر اندازه است. این امر می‌تواند ناشی از ورود یک جمعیت بلوری جدید به درون اتاق ماگمایی طی بالا آمدن ماگما باشد. هر مذاب در آشیانه ماگمایی سرگذشت هسته‌گذاری و درشت‌شدگی متقاوتی داشته، سپس به سطح زمین راه یافته، بسرعت سرد شده و بلورهای ریز و شیشه‌ای ایجاد کرده است. ورود مذاب جدید به آشیانه‌ی ماگمایی باعث افزایش حجم آن و خروج بلورها بهمراه ماگما به سطح زمین می‌شود. همچنین بهم ریختگی گرمایی در آشیانه ماگمایی منجر به ذوب برخی از بلورها و ایجاد لبه‌های تحلیل رفته یا بافت غباری می‌شود. از آنجا که جز لبه‌های غباری گروهی از پلاژیوکلازها، شواهد دیگری برای آمیختگی ماگمایی در این آندزیت بازالت‌ها وجود ندارد، می‌توان چنین نتیجه گرفت که ماگمای جدیدی که با مجموعه بلوری خود وارد آشیانه ماگمایی شده از نظر ترکیبی تفاوت چندانی با ماگمای میزبان نداشته است.

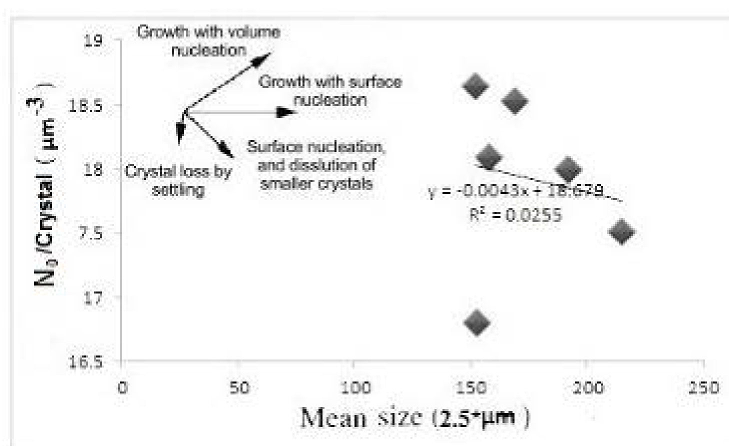
درشت شدگی

یکی از فرآیندهایی که برای توجیه تغییر شکل پلاژیوکلازها بیان می‌شود، درشت‌شدگی بافتی است [۱۹]. برای به کمینه شدن انرژی سیستم، اندازه‌ی میانگین دانه‌ها افزایش می‌یابد. درشت‌شدگی در ریزسنگ‌ها و بلورهای ریز پلاژیوکلاز رخ می‌دهد و این درشت‌شدگی به دلیل هسته‌گذاری سطحی در این کانی محدودیت دارد. در یک سیستم بسته، بلورهای کوچک‌تر از یک اندازه یا شعاع بحرانی حل می‌شوند و مواد به سمت دانه‌های درشت‌تر انتشار می‌یابند و حجم ثابت می‌ماند. ازین رو بجز اندازه بلور، موقعیت بلور طی رشد نیز اهمیت دارد. اما در سیستم باز، انتقال مواد توسط سیال به درون سیستم نیز روی می‌دهد و ممکن است حجم و ترکیب تغییر کنند. این شرایط در سیستم‌های ماگمایی می‌تواند ناشی از تزریق متناوب مذاب به درون مخزن باشد. در اثر تزریق مذاب به پایین آشیانه‌ی ماگمایی و بالا رفتن دما تا جایی که به دمای میعانی نزدیک نشود، درشت‌شدگی تا رسیدن به شعاع بحرانی رخ می‌دهد و پس از آن حتی انباشت‌های بلوری بسیار درشت نیز پایدار نمی‌مانند [۱۸]. درشت‌شدگی در حضور یک‌فاز سیال مانند گدازه رخ می‌دهد، هرچند در نبود آن، انتشار در میان دانه‌ها یا در راستای مرزهای بین‌دانه‌ای نیز صورت می‌گیرد [۷، ۱۷، ۲۲، ۲۴]. همچنین پلاژیوکلازهای شناور در مذاب گاه بصورت بخشی ذوب می‌شوند و گاه بهم چسبیده و با هم مراحل رشد و یا ذوب را پشت سر می‌گذارند که باعث ایجاد بافت‌های مشخصه پلاژیوکلاز می‌شود که به آن رشد سینوسی می‌گویند. اتصال بلورها به صورت سینوسی یا ادغام آنها از سازوکارهای موثر بر آرایش فضایی بلورهاست. رخداد به هم چسبیدن بلورها به ویژه در راستای وجوه بلوری پلاژیوکلازها به منظور کاهش انرژی سطحی بلور است، زیرا انرژی سطحی در محل تماس بلورهای یکسان نسبت به سطح تماس بلور– ماگما کم‌تر است [۲۲]. این بلورها ممکن است بهم چسبیده، رشد کرده و خوشه تشکیل دهند و یا اینکه یکی شده و در هم ادغام شوند. این فرآیند در مراحل اولیه تبلور با درصد کم بلورها در ماگما رخ می‌دهد [۲۵]. در نمونه‌های مورد بررسی، رشد سینوسی دیده می‌شود، اما این فرآیند تا حد ادغام بلورها پیش نرفته است. زیرا اتصال بلورهای کوچک طی صعود ماگما، می‌تواند در اثر جریان‌های برشی یا همآمیزی و همرفتی در آشیانه ماگمایی رخ دهد، اما ادغام بلورها در اصل در محیطی به نسبت ایستا انجام می‌شود [۲۵] که با شرایط آتشفشانی این سنگ‌ها همخوانی ندارد.

درشت‌شدگی بافتی می‌تواند در سیستم‌های بسته یا باز رخ دهد. اگر سیستم بسته باشد، باید مقدار کلی یک‌فاز ثابت بماند، در حالی‌که اندازه میانگین دانه‌ها افزایش می‌یابد. اگر سیستم باز باشد، مقدار یک‌فاز می‌تواند مستقل از اندازه‌ی میانگین دانه افزایش یابد [۲۱، ۲۲، ۲۴، ۲۶]. توجه به شکل ۷ نمونه‌های مورد بررسی از حالت سیستم باز پیروی کرده که خود از روند انحلال دانه‌های کوچک‌تر و هسته‌زایی سطحی پیروی می‌کنند (شکل ۸). باز بودن سیستم در یک محیط آتشفشانی قابل انتظار است. وجود بافت غباری و افزایش مقدار آنورتیت در لبه برخی از پلاژیوکلازهای مورد بررسی نیز باز بودن سیستم را تائید می‌کند [۶]، هرچند تغییرات ترکیبی ناشی از محیط باز لزوماً نباید تفاوت بسیار با ترکیب اولیه داشته باشد. تغییرات فشار بخار آب نیز چنین تاثیری ایجاد می‌کند.



شکل ۷ ویژگی طولی بلور نسبت به هسته بندی اولیه و درشت شدگی در سیستم باز و همچنین انباشت بلوری بلورهای مورد بررسی [۲۶] .



شکل ۸ نمودار همبستگی معکوس حجم بلور با میانگین اندازه بلورهای مورد بررسی [۴] که نشان می‌دهد کـه در پلاژیوکلازهـا درشـت‌شـدگی از هسته‌گذاری سطحی و هضم بلورهای کوچک‌تر پیروی می‌کند.

برداشت

از بررسی پراکندگی اندازه و شکل بلور برای بلورهای پلاژیوکلاز آندزیت بازالت‌های شمال گاوخونی نتایج زیر بدست آمد:

۱- پلاژیوکلازهای مورد بررسی بصورت ریزبلور و درشت بلور با منطقه‌بندی شیمیایی نوسانی، عادی و حتی معکوس گاه با بافت غباری و گاه با رشد سینوسی دیده می‌شوند. شکل سه بعدی بلورهای آنها در گستره‌های دوکی و تیغه‌ای قرار می‌گیرد. افزایش نرخ هسته‌بندی، افزایش نرخ نفوذ ترکیبات سازنده اجزای بلوری نسبت به زمینه، افزایش سرعت سرد شدن و کاهش فشار سیستم تبلور بر شکل سه بعدی اثر دارد که این با ماهیت آتشفشانی آنها همخوانی دارد.

۲- سرعت هسته‌بندی برای بلورهای پلاژیوکلاز $mm^{-3}s^{-1}$ $۲٫۷۷\times۱۰^{-۸}$ تا $۳٫۰۷\times۱۰^{-۸}$ و مدت زمان سردشدن ۱۷٫۷۷-۷۱٫۰۸ سال محاسبه شد که نشان‌دهنده مدت زمان به نسبت کوتاه اقامت بلور در آشیانه ماگمایی، سردشدن سریع و سرعت هسته‌بندی بیش‌تر پلاژیوکلاز در یک سامانه ماگمایی آتشفشانی با تلاطم متوسط است.

۳- درشت‌شدگی بافتی نمونه‌های مورد بررسی وابسته به حالت سیستم باز است که خود از روند انحلال دانه‌های کوچک‌تر و هسته‌زایی سطحی پیروی می‌کنند و این در یک محیط آتشفشانی قابل انتظار است. رشد سینوسی نیز در درشت‌شدگی بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی نقش داشته است.

۴- نمودارهای پراکندگی اندازه بلور، همراهی جمعیت‌های بلوری متغیر را نشان می‌دهند که می‌تواند ناشی از ورود یک

جمعیت بلوری جدید به درون اتاق ماگمایی باشد. ورود مذاب جدید و با مجموعه بلوری دیگری به آشیانه‌ی ماگمایی به نوبه‌ی خود باعث افزایش حجم آشیانه‌ی ماگمایی شده و به خروج ماگمای همراه با بلورهای پیشین کمک می‌کند که باعث کوتاه شدن مدت اقامت بلور در آشیانه‌ی ماگما شده است. همچنین بهم ریختگی گرمایی در آشیانه ماگمایی منجر به ذوب برخی از بلورها و ایجاد لبه‌های تحلیل رفته یا بافت غباری می‌شود. گرمای ناشی از ورود ماگمای جدید به آشیانه ماگمایی نیز بر درشت شدگی بافتی اثر نسبی گذاشته است.

۵- وجود لبه‌های غباری و هضم گروهی از پلاژیوکلازها در این آندزیت بازالت‌ها نشانگر تغییرات دمایی و فشار بخار آب طی تبلور بلور است و نبود شواهد قوی برای آمیختگی شیمیایی ماگمایی نشان می‌دهد که ماگمای جدیدی که مجموعه بلوری خود را وارد آشیانه ماگمایی کرده از نظر ترکیبی تفاوت چندانی با ماگمای میزبان نداشته است.

مراجع

[1] Amini S., Eskandari A., *"Investigation of physical processes of crystallization in igneous rocks from SE Birjand using 3-D shape modeling of plagioclase crystals (in Persian*)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 18 (2011) 669-684.

[2] Ahmadi A., Firouzkouhi Z.F., Moridi Farimani A.A., Lentre D.R., "*Geochemical and textural characteristics of plagioclase as evidence for open-system processes: Case study from Bazman volcano SE Iran (in Persian)"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 25 (2017) 367-380.

[3] Modjarrad M., Shaykhbaglou S., *"Crystal Size Distribution of amphibole and plagioclase from zanbil adakitic dacites, Urmia- Iran: evidence for magma mixing and textural coarsening*", Acta Geodynamica et Geomaterhalia 13 (2016)181, 89–101.

[4] Pourkhorsandi H., Mirnejad H., Raiesi D., Hassanzadeh J., *"Crystal size and shape distribution systematics of plagioclase and the determination of crystal residence times in the micromonzogabbros of Qisir Dagh, SE of Sabalan volcano (NW Iran)*", Geologica Carpathica 66 (2015) 4, 257—268

[5] Nabavi H., Amidi M., *"The Geological map of Naein 1:100000",* (1972) Geological Survey of Iran.

[6] Noghreyan M., Khodami M., *"Magmatic evolution recorded by phenocrysts in volcanic rocks southeast of Isfahan"* , Journal of Tethys 2 (2014) 55-69.

[7] Higgins M.D., *"Magma dynamics beneath Kameni Volcano, Thera, Greece, as revealed by crystal size and shape measurements*", Journal of Volcanology and Geothermal Research 70(1996) 37-48.

[8] Shea T., Hammer J. E., *"Kinetics of cooling- and decompression-induced crystallization inhydrous mafic-intermediate magmas*", Journal of Volcanology and Geothermal Research 260 (2013) 127–145.

[9] Putirka K A, *"Igneous thermometers and barometers based on plagioclase plus liquid equilibria: Tests of some existing models and new calibrations*", American Mineralogist 90 (2005) 336-346

[10] Blundy J., Cashman K., Humphreys M., *"Magma heating by decompression-driven crystallization beneath andesite volcanoes*", Nature 443 (7107) 76–80.

[11] Shcherbakov V. D., Plechov P. Y., Izbekov P. E., Shipman J. S., *"Plagioclase zoning as an indicator of magma processes at Bezymianny Volcano, Kamchatka",* Contributions to Mineralogy and Petrology 162 (2011) 83-99.

[12] Streck M. J., *"Mineral textures and zoning as evidence for open system processes"*, Reviews in Mineralogy & Geochemistry 69(2008) 595-622.

[13] Higgins M.D., *"Determination of crystal morphology and size from bulk measurements on thin sections: numerical modeling"*, American Mineralogist 79 (1994) 113-119.

[14] Morgan D.J., Jerram D.A., *"On estimating crystal shape for crystal size distribution analysis",* Journal of Volcanology and Geothermal Research 154 (2006) 1–7.

[15] Mock A., Jerram D.A., *"Crystal size distributions (CSD) in three dimensions: insights from the 3D reconstruction of a highly porphyritic rhyolite*", Journal of Petrology 46 (2005) 1525–1541.

[16] Marsh B.D., *"Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization I. theory*", Contributions to Mineralogy and Petrology 99(1988) 277-291.

[17] Cashman K.V., *"Relationship between plagioclase crystallization and cooling rate*" Contributions to Mineralogy and Petrology 113(1993) 126 -142.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.3.683]

development of crystal size distribution in igneous rocks", Contribiotion to Mineralogy and Petroligy (2014) doi.167. 10.1007/s00410-014-1003-9.

[24] Higgins M.D., Roberge J., *"Crystal size distribution (CSD) of plagioclase and amphibole from Soufriere Hills volcano, Monteserrat: evidence for dynamic crystallization/textural coarsening cycles*", Journal of Petrology 44(2003) 1401-1411.

[25] Schiavi F., Walte N., Keppler H., *"First in situ observation of crystallization processes in a basaltic-andesitic melt with the moissanite cell*", Geology 37(2009) 963–966

[26] Higgins M.D., *"Origin of megacrysts in granitoids by textural coarsening: A Crystal Size Distri-bution (CSD) Study of Microcline in the Cathedral Peak Granodiorite, Sierra Nevada, California*", in Fernandez, C., and Castro, A., Eds, Understanding granites: Integrating Modern and classical techniques. Special Publication 158: London, Geological Society of London (1999) 207–219.

[18] Brugger C.R., Hammer J. E., *"Crystal size distribution analysis of plagioclase in experimentally decompressed hydrous rhyodacite magma"*, Earth and Planetary Science Letters 300 (2010) 246–254.

[19] Higgins M.D., *"Textural coarsening in igneous rocks, International*", Geology Review 53 (2011) 354–376.

[20] Higgins M.D., *"Measurement of crystal size distributions*", American Mineralogist, 85 (2000) 1105-1116.

[21] Higgins M.D., Roberge J., *"Crystal size distribution (CSD) of plagioclase and amphibole from Soufriere Hills volcano, Monteserrat: evidence for dynamic crystallization/textural coarsening cycles*", Journal of Petrology 44 (2003) 1401-1411.

[22] Higgins M. D., *"Quantitative textural measurement in igneous and metamorphic petrology",* Cambridge University, (2006) USA.

[23] Ni H., Keppler H., Walte N., Schiavi F., Chen Y., Masotta M., Li Z., *"In situ observation of crystal growth in a basalt melt and the*

[DOI: 10.29252/ijcm.27.3.683]